УДК 004.932.001.57

С.Г. Антощук, А.А. Николенко, Е.В. Ткаченко, О.Ю. Бабилунга
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина
anatolyn@ukr.net

Использование вейвлет-преобразования при локализации последовательностей символов

В статье предложен метод автоматического определения масштаба вейвлет-преобразования при локализации квазипериодических последовательностей (текстур, областей с символьной информацией и т.д.) путем анализа функции энергии коэффициентов вейвлет-преобразования. Реализация предложенного метода при разработке приложений, связанных с локализацией и распознаванием символьной информации, повысила универсальность таких систем за счет повышения точности локализации символьной информации путем автоматизации выбора масштаба вейвлет-преобразования.

Введение

Для многих практических приложений, связанных с анализом изображений, актуальна задача поиска характерных фрагментов, содержащих последовательность символов, которую построчно (постолбцово) можно рассматривать как квазипериодическую последовательность импульсов [1]. Задача поиска таких характерных фрагментов часто сводится к нахождению границ квазипериодических последовательностей, что позволяет локализовать необходимый фрагмент на изображении.

Квазипериодические последовательности в строке изображения рассматриваются как характерные области с отличительными пространственно-частотными свойствами. Поэтому для их локализации целесообразно использовать вейвлет-преобразование (ВП) [2], которое представляет собой свертку исходного сигнала с импульсной характеристикой определенного вейвлет-фильтра (вейвлета) заданного масштаба. Изменение масштаба ВП приводит к изменению его частотно-избирательных свойств. Выбор необходимого масштаба проводится с учетом априорной информации и осуществляется разработчиком субъективно на основании полученных результатов, требует коррекции при изменении исходных данных, что ограничивает возможности построения систем автоматического анализа изображений. Поэтому задача адаптивного определения масштаба ВП, которая рассматривается в данной работе, является актуальной.

Целью данной работы является разработка метода адаптивной локализации квазипериодической последовательности символов на изображениях с использованием вейвлет-преобразования. Для решения задачи локализации квазипериодических последовательностей могут применяться действительные вейвлеты, заданные в виде нечетных симметричных функций $\psi(t) = -\psi(t)$, имеющие компактный или эффективный носитель.

Выбор и реализация базиса вейвлет-преобразования

В качестве базисных функций ВП рассмотрены вейвлеты Хаара, Гаусса, «расщепленная» функция Гаусса, ограниченный синус, функции гиперболического вейвлет-преобразования (ГВП) (табл. 1), где s – масштабный уровень, ε, γ – некоторые

параметры преобразования. Эти функции могут использоваться в качестве базисных вейвлет-преобразования, поскольку удовлетворяют необходимым требованиям (локализации, допустимости, осцилляции и ограниченности) [2], [3]. Для оценки частотно-избирательных свойств базисных функций выполнен анализ их амплитудно-частотных характеристик, в результате которого установлено, что значение частоты в точке экстремума для всех функций определяется зависимостью

$$\omega_{extr} = \frac{k}{s}, \qquad (1)$$

где s – масштабный уровень, k – некоторая константа, определяемая типом базисной функции.

Таблица 1– Частотно-избирательные свойства базисных вейвлет-функций

Вейвлет	Функция	Модуль преобразования Фурье	ω_{extr}	$\omega_{\max}s, f_d, n$
Хаара	$\psi(x,s) = \begin{cases} 0, & \lvert x\rvert > s \\ sign(x), & \lvert x\rvert \le s \end{cases}$	$\hat{\psi}(\omega,s) = \dfrac{4\sin^2\left(\frac{\omega s}{2}\right)}{\omega}$	$\frac{2.33}{s}$	$\omega_{\max}s = 20c^{-1}$ $f_d > 0.07 Гц$ $n > 15$
Гаусса	$\psi(x,s) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\frac{x}{s}\cdot\exp\left(-\frac{x^2}{2s^2}\right)$	$\hat{\psi}(\omega,s) = \omega s^2 e^{-\frac{\omega^2 s^2}{2}}$	$\frac{1}{s}$	$\omega_{\max}s = 2.0c^{-1}$ $f_d > 0.16 Гц$ $n \ge 9$
«Расщепленная» функция Гаусса	$\psi(x,s) = \frac{sign(x)}{\sqrt{2\pi}}\cdot\exp\left(-\frac{x^2}{2s^2}\right)$	$\hat{\psi}(\omega,s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\omega^2 s^2}{2}} \int_0^{\frac{\omega s}{\sqrt{2}}} e^{z^2} dz$	$\frac{1.31}{s}$	$\omega_{\max}s = 14c^{-1}$ $f_d > 0.21 Гц$ $n \ge 25$
Ограниченный синус	$\psi(x,s) = \begin{cases} 0, & \lvert x\rvert > s\pi \\ \sin\left(\frac{x}{s}\right), & -s\pi \le x \le s\pi \end{cases}$	$\hat{\psi}(\omega,s) = \frac{2s}{1-\omega^2 s^2}\sin(s\omega\pi)$	$\frac{0.838}{s}$	$\omega_{\max}s = 1.5c^{-}$ $f_d > 0.08 Гц$ $n \ge 9$
Функция ГВП	$\psi(x,s) = \begin{cases} 0, & \lvert x\rvert > \gamma s \\ -\frac{1}{1-\frac{x+1}{s}}, & -\gamma s \le x \le -\varepsilon \\ 0, & -\varepsilon < t < \varepsilon \\ \frac{1}{1+\frac{x-1}{s}}, & \varepsilon \le x \le \gamma s \end{cases}$	$\hat{\psi}(\omega,s) = 2s\int_{\varepsilon}^{\gamma s}\frac{\sin(\omega x)}{s+x-1}dx$	$\frac{2.84}{\gamma s}$	$\omega_{\max}s = 6.9c^{-}$ $\gamma = 8, \quad \varepsilon = 1$ $f_d > 0.08 Гц$ $n \ge 16$

Таким образом, все анализируемые базисные вейвлет-функции имеют похожие частотно-избирательные свойства, но значение частоты в точке экстремума на одинаковом масштабе отличается. Это необходимо учитывать при выборе базиса для выделения структурных особенностей изображения с разной степенью детализации.

Вторым важным вопросом, связанным с непрерывным ВП, является его реализация при обработке изображений. При компьютерной обработке изображение рассматривается как двумерный массив. Причем двумерные операции обработки могут быть заменены одномерными по строкам и по столбцам (строка либо столбец изображения может рассматриваться как дискретная последовательность $\{f_n\}$). Непрерывное ВП некоторой дискретной последовательности определяется как свертка этой последовательности с базисной функцией ψ_0, которая соответствующим образом перенормируется с масштабом s и сдвигается по пространственной шкале на интервал $n\Delta x$:

$$W(n,s)=\sum_{n'=0}^{N-1} f_n \psi^*\left(\frac{(n'-n)\Delta x}{s}\right).$$

Таким образом, изменение масштабного уровня s непрерывного вейвлета с шагом дискретизации Δx эквивалентно дискретизации начального вейвлета с новым шагом $\Delta x_s = \frac{\Delta x}{s}$. Полученный в результате дискретный вейвлет является масштабированным начальным вейвлетом. При таком подходе к определению масштаба вейвлета дискретный вейвлет является аппроксимацией непрерывного вейвлета и совпадает с ним при $s \to \infty$ ($\Delta x_s \to 0$), а аналогом масштабного коэффициента s выступает изменяющееся количество отсчетов импульсной характеристики, т.е. длина дискретного вейвлет-фильтра.

Тогда, изменяя масштабный коэффициент s и величину сдвига вейвлетной функции, можно локализовать любые особенности изображения в пространстве масштабов.

При выборе шага дискретизации Δx стараются его максимизировать (или минимизировать частоту дискретизации), это обусловлено желанием снизить количество арифметических операций, требуемых для реализации алгоритма, которое пропорционально числу отсчетов, подвергаемых обработке.

Таким образом, правильный выбор частоты дискретизации позволяет сохранить свойства непрерывного вейвлет-преобразования при дискретной реализации и определяет быстродействие алгоритма преобразования. Непосредственно применить теорему Котельникова не представляется возможным, поскольку базисные функции ВП имеют конечный носитель (т.е. удовлетворяют условию локализации) и неограниченный спектр. Поэтому для определения максимальной частоты ω_{max} в спектре базисной функции найдем вклад частот от 0 до ω_{max} в энергию сигнала, т.е. положим

$$\beta = E_{\max} / E_{\infty} < 1,$$

где E_{max} – энергия сигнала в полосе частот $0-\omega_{\max}$, E_{∞} – полная энергия сигнала, имеем

$$E_{\infty}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\hat{\psi}(\omega,s)\right|^2 d\omega=\int_{-\infty}^{\infty}\left|\psi(x,s)\right|^2 dx=2\int_{0}^{\infty}\left|\psi(x,s)\right|^2 dx,$$

$$E_{max}(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\omega_{max}}^{\omega_{max}}\left|\hat{\psi}(\omega,s)\right|^2 d\omega=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\omega_{max}}\left|\hat{\psi}(\omega,s)\right|^2 d\omega.$$

Тогда уравнение для определения ω_{max} имеет вид:

$$\int_0^{\omega_{max}} \left|\Psi(\omega, s)\right|^2 d\omega = 2\pi\beta \int_0^{\infty} \left|\psi(x, s)\right|^2 dx\,. \qquad (2)$$

Решая (2) для конкретной базисной функции, можно найти ω_{max}.

Например, если для ГВП

$$\int_0^{\infty} \left|\psi(x,s)\right|^2 dx = \int_{\varepsilon}^{\gamma} \frac{dx}{\left(1+\frac{x-1}{s}\right)^2} = \frac{s^2(\gamma s-\varepsilon)}{(s+\varepsilon-1)(s+\gamma s-1)},$$

уравнение (2) приобретает вид

$$\frac{4s^2}{\pi} \int_0^{\omega_{max}} \left| \int_{\varepsilon}^{\gamma s} \frac{\sin(\omega x)}{s+x-1} dx \right|^2 d\omega = 2\beta \frac{s^2(\gamma s-\varepsilon)}{(s+\varepsilon-1)(s+\gamma s-1)}$$

или

$$\int_0^{\omega_{max}} \left| \int_{\varepsilon}^{\gamma s} \frac{sin(\omega x)}{s+x-1} dx \right|^2 d\omega = \frac{\pi\beta(\gamma s-\varepsilon)}{2(s+\varepsilon-1)(s+\gamma s-1)}. \qquad (3)$$

При $\beta = 0.95$, $\gamma = 8$ и $\varepsilon = 1$ численно решая (3), находим значение $\omega_{max} s = 6.86$ с$^{-1}$.

Отсюда можно определить период дискретизации T, частоту дискретизации f_d и минимальное количество точек дискретизации базисной функции (порядок n дискретного фильтра, реализующего ВП)

$$T \le \frac{\pi}{\omega_{max}},\; n \ge \frac{2\gamma s}{T} \text{ и } f_d = \frac{1}{T}.$$

Результаты аналогичных расчетов для остальных базисных функций приведены в табл. 1.

При полученных значениях частота дискретизации f_d является рациональной, т.е. достаточно высокой для того, чтобы не возникало наложение спектров дискретизированных функций. Основные свойства непрерывных функций сохраняются. Эксперименты показали, что амплитудно-частотные характеристики соответствующей непрерывной функции и ее дискретной реализации достаточно близки. Среднеквадратическая ошибка при этом (ошибка аппроксимации) не превышала 5%.

Методика выбора масштаба вейвлет-преобразования

Анализ амплитудно-частотных характеристик этих функций показал, что значение частоты, соответствующей экстремуму АЧХ, определяется выражением (1) и обратно пропорционально величине масштаба. Это свойство предлагается использовать при локализации квазипериодических последовательностей. Исследован характер функции энергии коэффициентов ВП в зависимости от его масштаба (длины вейвлет-фильтра) (рис. 1). Было установлено, что такая зависимость для квазипериодических объектов имеет несколько экстремальных точек (не менее двух – локальный максимум и минимум), в то время как аналогичная зависимость для однородного объекта имеет монотон-

но возрастающий характер. Значение масштаба, соответствующее первому локальному максимуму, характеризуется резонансом вейвлета и последовательности (совпадением периодов) и позволяет зафиксировать необходимый масштаб для обнаружения отдельных элементов данной последовательности. При достаточно большом масштабе s вейвлет-преобразования (превышающем значение, соответствующее последнему локальному минимуму) квазипериодическая последовательность воспринимается как однородный объект, отдельные импульсы последовательности становятся неразличимы. Поэтому для обнаружения границ последовательности можно использовать значение масштаба, превышающее величину, при которой наблюдается последний локальный минимум. Следует заметить, что при дальнейшем увеличении масштаба вид зависимости энергии становится монотонно возрастающим и стремится к некоторому предельному значению, определяемому типом базисной функции и количеством импульсов в квазипериодической последовательности.

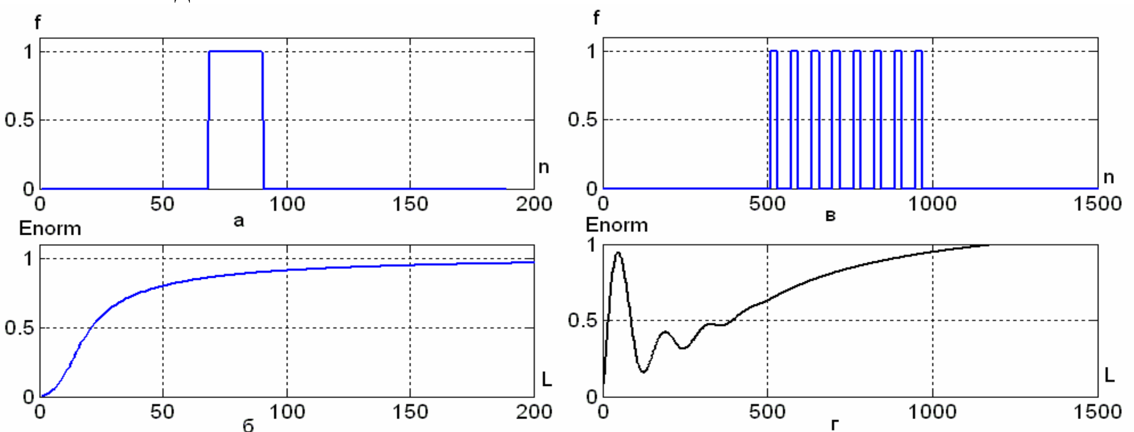


Рисунок 1 – Зависимость энергии вейвлет-преобразования от масштаба ВП:
а), в) – графики исходных сигналов одиночного объекта и последовательности,
б), г) – соответствующие зависимости энергии ВП от масштаба

На рис. 1 представлена нормированная зависимость энергии ВП (для вейвлета Хаара) квазипериодической последовательности E_{norm} от длины вейвлет-фильтра $L = 2\,s + 1$ (s – масштаб ВП). Зависимость энергии от длины вейвлета имеет характерный первый максимум, координата которого определяется периодом следования импульсов, а последующие максимумы повторяются через интервал, равный удвоенному периоду следования импульсов. Следовательно, по количеству локальных экстремумов можно оценить количество импульсов в последовательности. Исследование зависимости энергии ВП от масштаба для разных базисных функций показало, что многоэкстремальный характер этой зависимости наблюдается только при наличии значительных боковых лепестков в их АЧХ (вейвлет Хаара, гиперболическое вейвлет-преобразование, ограниченный синус [3]). Для «гладких» вейвлет-функций многоэкстремальность не наблюдается.

Метод адаптивно-структурной локализации

На базе проведенных исследований был предложен метод адаптивно-структурной локализации с целью интерпретации изображений в системах автоматической обработки. Проиллюстрируем его на примере решения задачи локализации символьной информации (СИ).

Структурная схема метода адаптивно-структурной локализации СИ на основе разработанной методики выбора масштаба представлена на рис. 2.

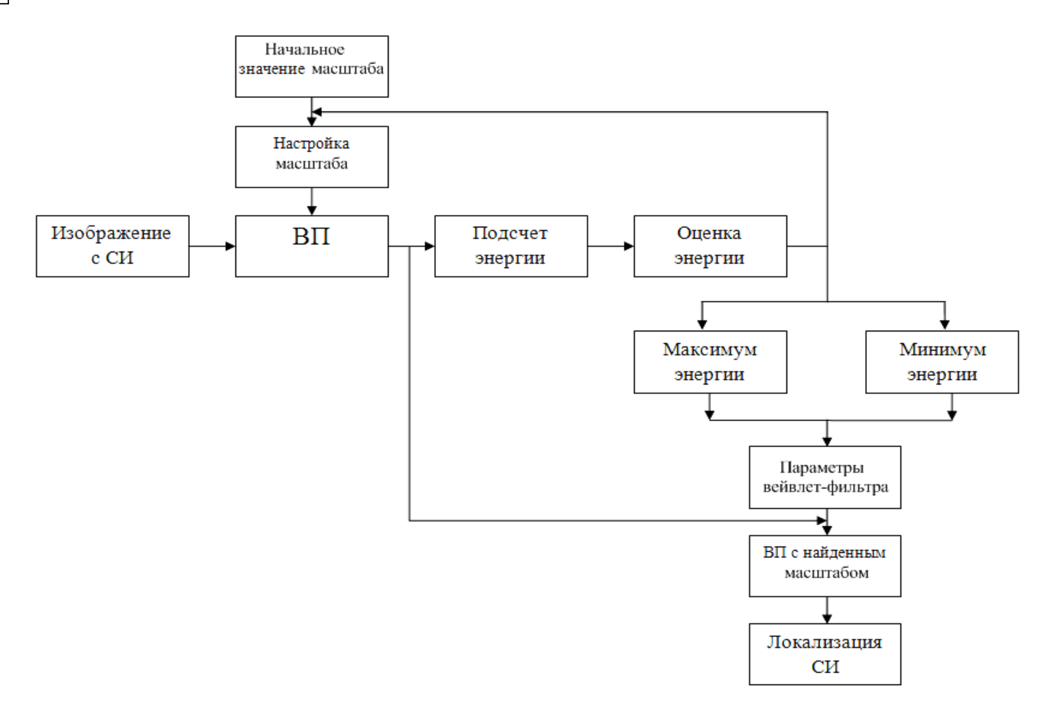


Рисунок 2 – Структурная схема метода адаптивно-структурной локализации СИ

Для реализации метода выполняются следующие этапы:

1. Вычисляется зависимость значения энергии ВП на разных масштабах (масштабных уровнях) s, обработки изображения, демонстрирующие работу метода адаптивной проводится ее анализ и делаются выводы о присутствии СИ; по положению экстремумов зависимости определяются необходимые масштабные уровни ВП.
2. Производится ВП изображения на выбранном масштабном уровне.
3. Определяются левая и правая границы СИ по положению экстремумов ВП.
4. Выполняется локализация СИ разных размеров.

При таком подходе на каждой итерации происходит подстройка масштабного уровня с целью достижения экстремума функции энергии, что может быть осуществлено итеративными методами поиска в пространстве ВП [4], [5].

Результаты компьютерной локализации СИ, приведены на рис. 3.

Исходное изображение содержит квазипериодические последовательности (участки СИ с разными шрифтами), однородный объект и фон. Предложенный метод позволил при адаптивном выборе масштаба локализовать характерные фрагменты – области символов различной величины.

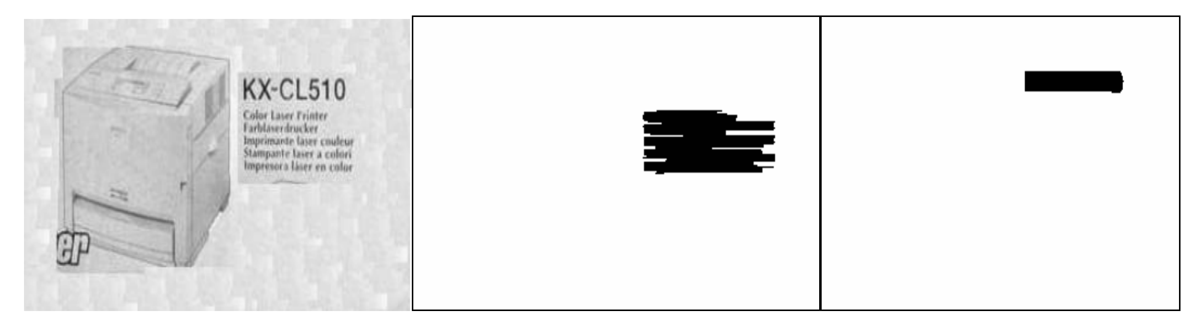


Рисунок 3 – Примеры выделения областей символьных надписей с разными размерами шрифта на изображении

Выводы

Предложен метод автоматического определения масштаба вейвлет-преобразования при локализации квазипериодических последовательностей (текстур, областей с символьной информацией и т.д.) путем анализа функции энергии коэффициентов ВП. Показано, что при этом базисные функции ВП должны быть симметричными и нечетными. Проведенные исследования легли в основу метода адаптивно-структурной локализации квазипериодических последовательностей на изображении. Исследования помехоустойчивости метода адаптивно-структурной локализации СИ на изображениях показало его работоспособность при воздействии гауссовского шума с отношением сигнал/шум 5 и более (по мощности). Реализация предложенного метода при разработке приложений, связанных с локализацией и распознаванием символьной информации, повысила универсальность таких систем за счет повышения точности локализации СИ путем автоматизации выбора масштаба ВП.

Литература

1. Антощук С.Г. Адаптивна локалізація символьних написів на зображеннях методом вейвлет-аналізу / С.Г. Антощук, О.Ю. Бабілунга, А.О. Ніколенко, О.В. Ткаченко // Вісник ЖІТІ. – 2008. – № 4. – С. 125-130.
2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов / Малла С. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
3. Антощук С.Г. Анализ базисных функций вейвлет-преобразования при мультимасштабном контурном представлении изображений / С.Г. Антощук, А.А. Николенко, Е.В. Ткаченко // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2009. – Вип. 72. – С. 15-19.
4. Антощук С.Г. Контурная сегментация полутоновых изображений методами вейвлет-анализа / С.Г. Антощук, О.Ю. Бабилунга, А.А. Николенко, Т.А. Буряк // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – С. 187-192.
5. Антощук С.Г. Повышение быстродействия контурного описания полутоновых изображений приближенными методами / С.Г. Антощук, О.Ю. Бабилунга, А.А. Николенко // Труды Одесс. политехн. ун-та. – Одесса, 2007. – Вып. 1(27). – С. 118-123.

С.Г. Антощук, А.О. Ніколенко, О.В. Ткаченко, О.Ю. Бабілунга

Використання вейвлет-перетворення при локалізації послідовностей символів

У статті запропоновано метод автоматичного визначення масштабу вейвлет-перетворення при локалізації квазіперіодичних послідовностей (текстур, областей з символьною інформацією (СІ) тощо) шляхом аналізу функції енергії коефіцієнтів вейвлет-перетворення. Реалізація методу при розробці додатків, які пов’язані з локалізацією та розпізнаванням символьної інформації, підвищила універсальність таких систем за рахунок збільшення точності локалізації СІ шляхом автоматизації вибору масштабу вейвлет-перетворення.

S.G. Antoshchuk, A.A. Nikolenko, E.V. Tkachenko, O.Yu. Babilunga

Localization of Symbolic Sequences Using Wavelet Transforms

Method of automatically determining wavelet transform scale on the base of analyzing the function of the energy wavelet transform coefficients is proposed. It is used for localization of quasiperiodic sequences (patterns, areas with character information, etc.). The proposed method is used in image processing systems related to the localization and recognition of the symbolic information. It is allowed to increase versatility of such systems by improving the accuracy localization of the symbolic information by automating choice of scale wavelet transform.

Статья поступила в редакцию 30.06.2009.